

На правах рукописи

МАЛЬЦЕВ КИРИЛЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА РЕСПУБЛИКИ
ТАТАРСТАН СРЕДСТВАМИ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальности: 25.00.36 – «Геоэкология»

25.00.25 - «Геоморфология и эволюционная география»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук

Казань – 2006

Работа выполнена на кафедре ландшафтной экологии Казанского государственного университета

Научные руководители: доктор географических наук, профессор Олег Петрович Ермолаев

доктор биологических наук, кандидат физико-математических наук, доцент Анатолий Александрович Савельев

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор Вячеслав Владимирович Сироткин

кандидат географических наук, доцент Вадим Владимирович Можжерин

Ведущая организация: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Удмуртский государственный университет (г.Ижевск)

Защита диссертации состоится 6 апреля 2006 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.20 по специальностям 25.00.36 – геоэкология, 25.00.25 – геоморфология и эволюционная география в Казанском государственном университете по адресу: 420018, г.Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 2, 15 этаж, аудитория 1512, тел., факс (843) 292-05-54

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « » марта 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Д 212.081.20 кандидат географических наук,

доцент

Ю.Г. Хабутдинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Рельеф является одним из главных факторов, обуславливающих развитие различных природных процессов на поверхности Земли. Он во многом определяет особенности формирования поверхностного стока и широкого спектра склоновых экзодинамических процессов, перераспределяет приходящую солнечную радиацию, обуславливая, тем самым, ландшафтную дифференциацию даже на локальных территориях.

Анализ вклада рельефа в функционирование геосистем требует использования количественных методов, одним из которых является морфометрический анализ, традиционно являющийся методом геоморфологии. Однако морфометрический анализ может быть с успехом использован и для решения различных геоэкологических задач.

Рельеф наилучшим образом может быть охарактеризован системой морфометрических показателей, зафиксированных на соответствующих картах. Интенсивное развитие на современном этапе геоинформационных технологий позволяет существенно упростить получение массового количественного материала по рельефу и его представление в виде тематических карт. Поэтому в настоящее время широко используют электронное описание рельефа, которое в контексте географических информационных систем (ГИС) представлено цифровыми моделями рельефа (ЦМР). Во многих наиболее известных на сегодняшний день ГИС реализованы методики построения ЦМР, но все они имеют определенные ограничения и недостатки, что не позволяет в полной мере использовать возможности ГИС для морфометрического анализа. В связи с этим актуальной задачей является разработка методик, позволяющих построить модель рельефа с минимальными искажениями относительно его реальных характеристик.

В региональном плане актуальность работы определяется тем, что до настоящего времени для территории Республики Татарстан (РТ) отсутствуют систематизированные материалы по количественному анализу рельефа. Между тем такие исследования крайне необходимы для оценки вклада рельефа в развитие неблагоприятных экзогенных процессов, активно протекающих на территории РТ (почвенная и овражная эрозия, оползневые и другие склоновые процессы).

Целью диссертационной работы является

Анализ морфометрических характеристик и районирование рельефа Республики Татарстан с использованием ГИС – технологий, в аспекте решения геоэкологических задач.

В ходе работы решались следующие задачи:

- разработка новой более точной методики построения цифровой модели рельефа;
- сравнение точности методик построения цифровых моделей рельефа (в т. ч. с вновь разработанной методикой);
- комплексный морфометрический анализ рельефа РТ средствами ГИС-технологий;
- разработка методики автоматизированного районирования рельефа с использованием алгоритма самоорганизующихся отображений Кохонена и районирование рельефа территории РТ на основе данной методики;
- определение потенциальных потерь почвы РТ от природно-антропогенной эрозии средствами ГИС-технологий.

Исходные материалы

В качестве исходной информации для получения ЦМР использована электронная векторная топографическая карта РТ масштаба 1:200000, разработанная предприятием РосГИСцентр Федерального агентства геодезии и картографии России (Роскартография). Также привлекалась специализированная эколого-геоинформационная система, где в качестве операционно-территориальных единиц (ОТЕ) использовались элементарные речные бассейны с геопространственной базой данных. Данная система использует первичные данные, отнесенные к бассейнам, и полученные кафедрами ландшафтной экологии, физической географии и геоэкологии КГУ. Кроме того, были использованы: электронная векторная ландшафтная карта РТ масштаба 1:200000, составленная на кафедре ландшафтной экологии КГУ под руководством О.П. Ермолаева; карта почвенного покрова, разработанная ВолгоНИИГипрозем; карта модуля стока взвешенных наносов (А.П. Дедков, В.И. Можжерин). При расчете потенциальных потерь почвы были привлечены материалы, опубликованные С.Ф.Батыршиной (2005) о запасах воды в снеге за период 1961-2001 гг.

Научная новизна работы

- Разработана новая методика построения ЦМР, которая использует в качестве аппроксимирующей функции кубическую параболу и осуществляет моделирование рельефа вдоль линий тока.
- Произведена оценка точности построения ЦМР с использованием различных методик. Предложенная методика не уступает по точности моделирования рельефа известным разработкам, а по некоторым показателям превосходит их.
- На основе предложенной методики была построена ЦМР регионального уровня генерализации.

- Впервые проведен морфометрический анализ рельефа всей территории РТ средствами ГИС-технологий с использованием следующих показателей: абсолютной высоты, угла наклона, экспозиции, плановой и профильной кривизны, длины линий тока. Все эти показатели рассчитаны в узлах регулярной сети. Построен комплект электронных тематических морфометрических карт.
- Впервые на основе самоорганизующихся отображений Кохонена разработана методика автоматизированного типологического районирования рельефа, использующая в качестве классификационных признаков морфометрические показатели. С использованием данной методики проведено районирование рельефа РТ.
- Впервые для территории РТ проведена оценка потенциальных эрозионных потерь почвы на региональном уровне генерализации, построены тематические электронные карты, характеризующие пространственные закономерности эрозии почв.

Практическая значимость работы

Результаты, полученные в данной работе, могут быть применены для решения многочисленных геоэкологических задач: при расчете потенциальных потерь почвы от эрозии, определении устойчивости склонов к проявлению экзогенных процессов, в расчетах по определению прихода солнечной радиации на различные участки склонов, при ландшафтном районировании и планировании.

Разработанная методика может быть использована при построении ЦМР любого масштаба. Она также, может быть применена для построения цифровых моделей структурных поверхностей земной коры.

Результаты исследований внедрены при выполнении пяти проектов по оценке воздействия на окружающую среду при составлении технологических схем разработки нефтяных месторождений РТ (Первомайское, Бондюжское, Кадыровское, Комаровское, Ново-Суксинское месторождения). Результаты исследований внедрены также при издании монографии «Экология города Казани» (раздел «Рельеф и ландшафтная структура города Казани»).

Основные положения, выносимые на защиту

- Применение в процессе создания ЦМР кубической параболы в качестве аппроксимирующей функции и осуществление моделирования вдоль линий тока позволяет уменьшить ошибки при построении ЦМР.
- Результаты морфометрического анализа рельефа с использованием ГИС-технологий свидетельствуют о том, что на территории РТ существует зависимость между генетико-возрастными характеристиками рельефа и его морфометрическими параметрами. Последнее выражается в существенном изменении количественных характеристик рельефа

при переходе от глубоко расчлененной денудационной ступенчатой равнины ярусных плато к очень слабо расчлененной аккумулятивной террасовой равнине левобережий крупных рек (Волга, Кама, Вятка).

- Применение алгоритма самоорганизующихся отображений Кохонена и набора морфометрических параметров (высоты, угла наклона, экспозиции, профильной и плановой кривизны, длины линий тока), рассчитанных на основе ЦМР масштаба 1:200000 (на примере РТ), позволяет осуществить автоматизированное типологическое районирование рельефа. Результаты районирования могут стать базой для ландшафтного картографирования территории в ранге урочищ.
- Определение потенциальных, допустимых, а также безвозвратных потерь почв, представленных в виде электронных карт, может лечь в основу проектирования противоэрозионных мер для территории РТ.

Личный вклад автора

Автором разработана предлагаемая в работе методика построения ЦМР, проведен анализ количественных показателей рельефа РТ (получены соответствующие электронные карты). Разработаны методические подходы к автоматизированному типологическому районированию рельефа. Произведена оценка потенциальных эрозионных потерь почвы на территории РТ. Автор благодарит за сотрудничество и помощь на различных этапах работы: проф., д.г.н. О. П. Ермолаева, доц., д.б.н. А. А. Савельева, ст. преподавателя С. С. Мухарамову, а также О.В. Беленко, А.Р. Шайхулова, М.Е. Игонина, А.В. Колесникова.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались автором на Международных, Всероссийских, региональных и межвузовских научных конференциях в Казани (2003-2005), Краснодаре (2002), Тюмени (2003), Севастополе (2003), Санкт-Петербурге (2005).

Настоящая работа выполнялась в соответствии с НИР кафедры ландшафтной экологии Казанского госуниверситета «Ландшафтно-экологический анализ геопространства» номер государственной регистрации – 01.200.120120. В период 2004 -2005гг. исследования осуществлялись в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 04-05-64897а) - «Изучение роли ландшафтов в развитии природно-антропогенной эрозии с использованием современных математических методов (на примере Среднего Поволжья)».

Публикации. Основные результаты работы изложены в 11 статьях и тезисах. Работы опубликованы, либо приняты к печати в федеральных академических и региональных журналах, в международных и межвузовских трудах конференций.

Структура и объем работы. Общий объем диссертации 214 страниц текста. Она состоит из введения, шести глав и заключения. Включает в

себя 98 рисунков, 19 таблиц, список литературы, состоящий из 147 наименований, а также 12 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 Подходы к морфометрическому анализу рельефа

Здесь рассматриваются основные этапы развития морфометрии как области знания и исследователи, внесшие существенный вклад в развитие ее идей. В этой связи анализируются исследования, опубликованные в работах Ю.Г. Симонов, А. Болига, И.С. Щукина, В.П. Чичагова, А.С. Девдариани, И.П. Шарапова, О.А. Борсука, И.И. Спасской, Р.Х. Пиреева, В.И. Анисимова, Э.Л. Якименко, Д.А. Тимофеева, А.Н. Ласточкина и др.

При представлении рельефа как поля высот наиболее часто используется методика, изложенная, в частности, В.А. Червяковым (1979). Фактически, при подобном подходе, в качестве операционно-территориальной единицы (ОТЕ) используется узел регулярной сетки, а все вместе они образуют статистическую поверхность (Robinson, 1961), топографическую поверхность (Соболевский, 1932) или детерминантно-статистическую модель (Черванев, Голиков, Трофимов, 1986).

Поскольку в настоящее время морфометрический анализ рельефа в большинстве исследований предполагает использование ГИС, то в данной главе большое внимание уделено вопросу построения ЦМР. Например, А.М.Берлянт (2001) определяет ЦМР как совокупность (массив, файл) высотных отметок Z , взятых в узлах некоторой сети точек с координатами X , Y и закодированных в числовом формате.

В рамках ГИС рельеф может быть описан векторными и растровыми моделями, которые имеют свои преимущества и недостатки. Выбор того или иного представления рельефа зависит от цели и задач исследования. В нашей работе ЦМР использует растровое представление данных, поскольку оно позволяет рассчитывать морфометрические параметры рельефа. Если говорить более точно, то используется регулярная прямоугольная координатная сеть со значениями высот в ее узлах.

Можно выделить два кардинально различающихся способа получения таких моделей. Первый – это методы, основанные на обработке данных дистанционного зондирования земли: материалы радарной съемки, аэрофото- и космосъемка. В этой области существует много наработок и методик, а точность результатов весьма впечатляющая. Однако трудоемкость этих методов, специфичность и дороговизна программного обеспечения не способствуют широкому распространению такой технологии. Второй способ – построение моделей рельефа, используя информацию с топографических карт. Этот подход также не нов, имеет свои сильные и слабые стороны. Однако можно утверждать, что оцифрованные топографические материалы еще достаточно долгое время не потеряют своей актуальности, оставаясь главными источниками данных для подобного моделирования.

В рамках этого направления можно выделить исследования М. Хатчинсона, С.Н. Сербенюка, С.М. Кошеля, О.Р. Мусина. Всесторонний анализ исследований в области развития методов создания и использования ЦМР проведен С.М. Кошелем (2004). Он отмечает следующие наиболее популярные ГИС-пакеты и специализированные программы создания ЦМР: ArcGis; ILWIS; IDRISI; Surfer; MAG.

В этой главе также рассматриваются методы расчета морфометрических характеристик рельефа, базирующиеся на ЦМР. Разные исследователи предлагают оригинальные системы морфометрических показателей, по их мнению, наиболее полно описывающих рельеф. Все они основаны на вычислении производных методом конечных разностей.

Так, например И. Эванс (1972), предложил описывать форму рельефа системой из пяти показателей: абсолютной высоты, уклона, экспозиции, продольной и профильной кривизны. Близкие системы показателей предлагают: J. Krcho (1983), J.D.Wood (1990, 1995), R.J.Pike (1995) и др. Аналогичные идеи были высказаны отечественными исследователями: А. Н. Ласточкиным (1991) и П. А. Шарым (1995). Данные методики реализованы в программах «Эко» и «Landsurf» и др.

Похожую систему вычислений морфометрических показателей предлагается в программном комплексе «TAPES-G» (Moore, Lewis, Gallant, 1993), а также в специализированной программе «Surfer» (Mitasova, Hofierka, 1993). Следует отметить, что программы «Эко» и «TAPES-G» позволяют рассчитывать не только локальные морфометрические параметры, но и региональные, например, длину линий тока.

Проанализировав все многообразие предлагаемых методик и программных средств реализующих их, мы остановились на методике Эванса-Янг (Young, 1978). На наш взгляд, использование в этой методике восьми направлений при вычислении производных делает ее менее зависимой от ориентации координатных осей.

Глава 2 Создание цифровой модели рельефа для целей морфометрического анализа

В главе излагается разработанная нами методика построения ЦМР. Суть последней заключается в использовании алгебраического многочлена третьей степени (1) в качестве интерполирующей функции и измерение расстояния от узла сетки до горизонталей вдоль векторов градиентов рельефа (рис. 1), что позволяет сократить ошибки при построении ЦМР:

$$z(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (1)$$

где $z(t)$ – абсолютная высота узла сетки, а t – расстояние от узла сетки до горизонтали.

Для проверки работы предложенной методики была предпринята перекрестная проверка. Она заключается в удалении каждой второй горизонта-

ли, а оставшиеся используются для построения ЦМР. После этого вычисляется погрешность между абсолютной высотой на удаленных из построения горизонталях и абсолютной высотой в узлах ЦМР. Далее проводится статистический анализ полученных ошибок. Перекрестная проверка позволяет оценить, насколько адекватно разработанная методика рассчитывает отметки высот в узлах регулярной сетки. В качестве тестового был выбран рельеф участка местности близ населенного пункта Актюбинск. Площадь участка составляет 295.75 км^2 .

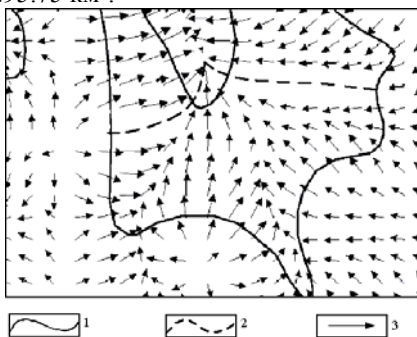


Рис. 1. Траектория движения при вычислении расстояний от узла сетки до горизонтали (линия вдоль векторов), где 1- горизонтالي, 2 – траектория, 3- вектора градиентов

В табл. 1 приводятся данные статистического анализа для 3-х наиболее известных методик построения ЦМР и методики, предложенной нами. Для статистического анализа во всех выборках были отсеяны грубые ошибки, составляющие более чем 30 м по модулю.

Таблица 1

Результаты сравнительного статистического анализа

	ArcGis (сплайн с натяжением)	MagSurf (модифицированная триангуляция Делоне)	Surfer (кригинг)	Кубические параболы
Количество	29575	29575	29575	29575
Среднее	-1.17	-2.06	-1.43	-1.11
Дисперсия	120.51	120.51	104.56	83.23
СКО	10.98	10.98	10.23	9.12
Грубые ошибки, %	2.95	3.34	3.17	3.26
Квантили:				
1%	-27.39	-26.85	-27.40	-25.65
5%	-18.56	-20.72	-18.34	-17.22
25%	-8.31	-8.99	-7.84	-6.45
75%	7.50	4.23	5.31	4.47
95%	16.51	17.61	16.03	13.96
99%	19.05	23.84	19.59	19.41

Как видно (табл. 1), методике «кубических парабол» присущи наименьшие значения таких показателей, как среднее, среднеквадратичное отклонение, квантиль ошибки. Значение меньшего среднего говорит о равенстве отрицательных и положительных ошибок. Небольшие значения среднеквадратичного отклонения и квантилей свидетельствуют о малом количестве узлов, в которых ошибки сильно отличаются от среднего. Это в свою очередь подтверждает факт уменьшения ошибок при построении ЦМР нашей методикой по сравнению с тремя наиболее распространенными методами.

Созданная методика расчета и программные средства, реализующие ее, были использованы для построения ЦМР РТ (рис.2). Данная модель была необходима в работе для проведения морфометрического анализа региона (с построением комплекта соответствующих карт) и классификации (районирования) рельефа.

В качестве исходного материала использована векторная топографическая карта РТ масштаба 1: 200000 с сечением основных горизонталей 20 м и вспомогательных - 10 м. Причиной, побудившей нас выбрать именно эту карту, является то, что масштаб 1: 200000 соответствует большинству проводимых тематических, региональных исследований, а также дает достаточно хорошее отображение особенностей равнинного рельефа региона. При построении модели использовался шаг координатной сетки 100 м. Последний обосновывается ошибками планового положения контуров на отечественных топографических картах, которые в среднем равны 0.5-0.75 мм (Берлянт, и др. 1988), что соответствует 100-150 м на местности в используемом масштабе.

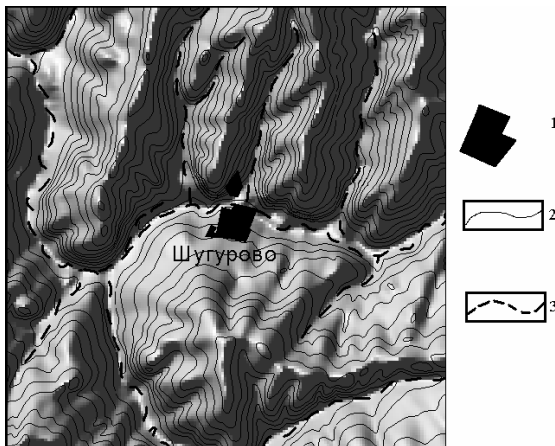


Рис. 2 Фрагмент ЦМР, построенной кубическими параболоми по горизонталям топографической карты масштаба 1:200000 (источник света помещен в левый верхний угол): 1- населенные пункты; 2- горизонтали (сечение 20 м); 3 – реки.

Следующим этапом работы являлась оценка влияния масштаба карты на качество получаемой цифровой модели рельефа и на точность вычисления значений углов наклона, что необходимо для оценки надежности проводимых работ для данного уровня генерализации.

Сопоставление детальности в отображении рельефа проведено для карт масштаба 1:200000 (сечение изогипс 20 м) и 1:50000 (сечение изогипс 10 м). Используя горизонтالي топографической карты масштаба 1:50000, были построены цифровые модели рельефа на три тестовых участка (1 – район г. Менделеевска; 2- Раифский участок Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПЗ); 3 – район с. Муртаза, р. Дымка).

Таблица 2

Статистические показатели ошибок, возникающих при сравнении ЦМР масштаба 1:200000 и масштаба 1:50000 для трех тестовых участков

Название участка и его номер	Количество узлов сетки	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Нижняя квартиль	Верхняя Квартиль
Вост. Предкамье (г. Менделеевск) - №1	21383	6.1	3.8	7.8	1.6	7.5
Зап. Предкамье (ВКГПЗ-пос.Садовый) - №2	13607	5	2.9	6.4	1.2	6.1
Бугульминско-Белебеевская возвышенность (с.Муртаза) - №3	25319	6.4	4.7	6.2	2.2	7.6

Как видно из табл. 2, средние значения ошибки незначительны и составляют около 5-6 м. Более того, 75 % всех ошибок лежит в диапазоне от 0 до 6-7 м. Это позволяет утверждать, что морфометрический анализ, проведенный по карте масштаба 1:200000, достаточно хорошо (для данного уровня генерализации) отражает распределение ключевых показателей равнинного рельефа. Максимальные значения ошибок тестируемых участков приурочены к их краям и обусловлены возникновением т. н. «краевых эффектов».

Кроме того, были проведены исследования по выявлению возможных ошибок, возникающих при построении карты углов наклона масштаба 1:200000 по сравнению с картой масштаба 1:50000. Исследования проводились по тем же тестовым участкам (был разделен только участок 1 на правую и левобережные участки Нижнекамского водохранилища).

Анализируя полученные статистические материалы (табл. 3), можно видеть, что среднее значение ошибки положительно для всех четырех участков. Как и следовало ожидать, углы наклона, определенные по ЦМР масштаба 1:200000, несколько занижены по сравнению с углами наклона, полученными при использовании ЦМР масштаба 1:50000. Ошибки определения углов наклона, построенных по картам масштаба 1:200000, не превышают в

среднем 25 % по сравнению с данными, полученными по картам масштаба 1:50000. Кроме того, можно говорить о некой возникающей пространственной структуре ошибки. Анализ карт распространения ошибки показывает, что знак последней почти не изменяется вдоль горизонталей и чередуется по направлению поперечного профиля склона.

Таблица 3

Статистические показатели ошибок, полученных при сравнении углов наклона, рассчитанных по ЦМР карт масштаба 1:200000 и масштаба 1:50000 для четырех тестовых участков

Название участка и его номер	Количество узлов	Среднее	Стандартное отклонение	Нижняя квартиль	Верхняя квартиль
Вост. Предкамье (г. Менделеевск) (левый берег) - №1	14414	1.02	1.27	0.26	1.24
Вост. Предкамье (г. Менделеевск) (правый берег) - №2	9972	0.86	1.15	0.19	1
Зап. Предкамье (ВКГПБЗ – пос.Садовый) - №3	12688	0.86	1.11	0.2	1
Бугульминско-Белебеевская возвышенность (с.Муртаза) - №4	24609	1.48	1.56	0.41	1.99

Из проведенного статистического анализа можно сделать ряд выводов. Для всех тестовых участков при укрупнении масштаба происходит увеличение среднего, верхней и нижней квартилей, увеличение дисперсии и стандартного отклонения. Последнее свидетельствует о том, что при укрупнении масштаба происходит увеличение доли территорий с большими углами наклона. В зависимости от участка занижение углов наклона может быть больше или меньше. Так, например, на участке 1 – мы имеем среднюю ошибку в определении угла наклона около 10 %, на участке 2 - эта ошибка составляет 21 %, на участке 3 - около 30 %, на участке 4 ошибка не превышает 2 %. Можно сказать, чем больше расчленен рельеф, тем большие ошибки возникают при расчете углов наклона при уменьшении масштаба карты. Однако, если соотнести эти ошибки со средними значениями углов наклона тестируемых участков, то можно утверждать, что чем меньше колебание высот в пределах одного участка, тем больше ошибка в определении углов наклона при уменьшении масштаба карты.

Таким образом, главными результатами в данной главе являются:

- Методика построения ЦМР с использованием кубических парабол, позволяющая производить расчеты с меньшими ошибками по сравнению с наиболее известными методиками;
- Создание цифровой модели рельефа РТ с шагом 100 м масштаба 1:200000 с применением нашей методики;

- Количественная оценка качества модели, показывающая, что при укрупнении масштаба от 1:200000 к 1:50000 средние ошибки при определении высот в узлах ЦМР не превышают 5-6 м, а ошибки в определении углов наклона составляют 0.8 - 1.5° при сравнении карт тех же масштабов.

Глава 3 Морфометрический анализ рельефа Республики Татарстан

В главе рассматривается изученность территории РТ с позиции морфометрического анализа рельефа. В этой связи можно отметить исследования В.Н. Сементовского (1940, 1955, 1963), А.П. Дедкова (1970), В.П. Филофова (1960, 1975), О.П. Ермолаева (1992, 2002), А.В. Серебрякова, Л.А. Гольмгрейна (2005), И.Ю. Черновой с соавторами (2005), а также коллективный труд «Овражная эрозия востока Русской равнины» (1990). Однако, несмотря на то, что морфометрические исследования на территории РТ проводились неоднократно, все они, на наш взгляд, имеют определенные ограничения. Работы, проводившиеся до активного внедрения ГИС, как правило, осуществлялись по крупным ОТЕ (например, речным бассейнам) и не имеют необходимой детальности для решения задач регионального уровня. Региональные исследования, в которых активно используются ГИС и ЦМР, для вычисления параметров рельефа в узлах сетки основаны на существующих методиках и нацелены на решение вполне определенных задач. В них не проводится анализ территориальной изменчивости морфометрии рельефа региона в связи друг с другом, а также с его возрастом и генезисом.

Нами для количественной характеристики рельефа РТ, помимо расчета высот по вновь разработанной методике, в каждом узле сетки предлагается рассчитывать такие морфометрические показатели, как угол наклона, экспозицию, профильную и плановую кривизну, длину линий тока. По мнению Е.М. Николаевской (1966), А.Н. Ласточкина (1991), Ю.Г. Симонова (1999) обязательным при проведении морфометрического анализа рельефа является построение карт абсолютной высоты, угла наклона и экспозиции. Однако при решении геоэкологических задач необходим расчет плановой кривизны, выделяющей участки концентрации или рассеивания поверхностного стока (рис. 3), а также профильной кривизны, по сути отображающей не только форму склона, но и участки преобладающей денудации и аккумуляции (рис. 4). Бесспорно, очень полезна карта длин линий тока, поскольку данный показатель входит во многие эмпирические уравнения расчета потерь почвы от поверхностно-склоновых видов эрозии.

Таким образом, были построены 6 электронных тематических морфометрических карт и проведен статистический анализ данных величин. Из него следует, что на территории РТ преобладают территории (39 %) с рельефом, который можно отнести к слаборасчлененной полигенетической равнине. Она располагается на отметках 140-200 м (Бутаков и др., 1993). Мини-

мальную площадь занимают останцовые холмы древних поверхностей выравнивания. В Татарстане около трети территорий (33.7 %) имеют углы наклона 1-2°. На территории РТ можно отметить небольшое преобладание склонов холодной экспозиции. Для этого региона востока Русской Равнины вогнутых в плане территорий (46.5%) меньше, чем выпуклых (53.5%), что говорит о преобладании участков с рассеиванием стока. Похожая картина характерна и для профильной кривизны. Анализ длин линий тока свидетельствует о преобладании склонов средней длины – 50 -500 м.

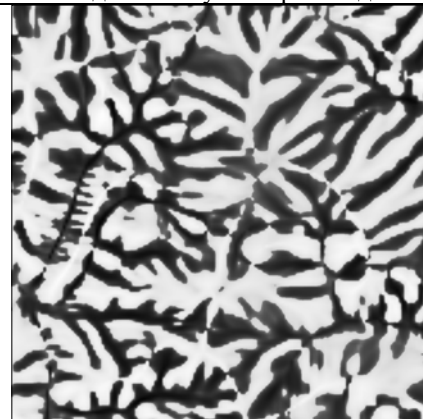


Рис. 3. Плановая кривизна (светлый тон – области рассеивания потока, темный - области концентрации)



Рис. 4. Профильная кривизна (светлый тон – области денудации, темный - области аккумуляции)

Глава 4 Географический анализ морфометрических характеристик рельефа Республики Татарстан

Проведен анализ изменчивости этих характеристик в границах геоморфологических районов РТ, выделенных А.П. Дедковым (1999). В основу районирования им было положено выделение 4-х основных типов рельефа (I- глубоко расчлененная денудационная ступенчатая равнина ярусных плато, II- умеренно-расчлененная денудационная равнина нижнего плато, III - слабо расчлененная низкая полигенетическая равнина, IV- очень слабо расчлененная аккумулятивная террасовая равнина левобережий крупных рек – Волги, Камы и Вятки) различных по морфологии, генезису и возрасту. Для каждого типа намечены регионы их распространения, группирующиеся по основным географическим областям Татарстана. Для анализа использовалась рукописная карта А.П.Дедкова, переведенная в векторный формат. При географическом анализе особенностей рельефа за основу взяты его количественные характеристики. В каждом геоморфологическом районе на базе созданной ЦМР нами дополнительно были рассчитаны основные статистические показатели и построены гистограммы частот высоты, углов наклона, экспозиции склонов, длины линий тока, профильной и плановой кривизны. Именно эти морфометрические показатели в значи-

тельной мере характеризуют энергетический потенциал рельефа, определяя во многом условия протекания широкого спектра экзогенных процессов. Также дополнительно для каждого района по сетке речных бассейнов были подсчитаны следующие характеристики, отражающие как пространственное развитие склоновых процессов (густота овражного расчленения, интенсивность бассейновой эрозии, сток взвешенных наносов), так и условия, на фоне которых они формируются (густота долинного и балочного расчленения, тип четвертичных отложений, глубина расчленения).

Поскольку эти показатели приведены к сетке элементарных бассейнов, нам было необходимо присвоить соответствующие значения узлу регулярной сетки, попадающему в тот или иной бассейн и далее рассчитать соответствующий показатель для каждого геоморфологического района.

Анализ пространственного изменения морфометрических величин рельефа РТ позволяет отметить, что при переходе от глубоко расчлененной денудационной ступенчатой равнины ярусных плато к очень слабо расчлененной аккумулятивной террасовой равнине левобережий крупных рек закономерно уменьшаются значения высоты, угла наклона, профильной и плановой кривизны, наконец, происходит увеличение длин линий тока. Для того, чтобы проверить это, средние значения соответствующих величин были проанализированы в статистическом пакете Statgrafics 5.0. Дисперсионный анализ показал статистически значимую связь между указанными параметрами. Кроме того, рассчитаны коэффициенты корреляции и построены регрессии, значения и графики которых убедительно доказывают взаимосвязанное изменение морфометрических показателей при переходе от одного типа рельефа к другому (рис. 5-6).

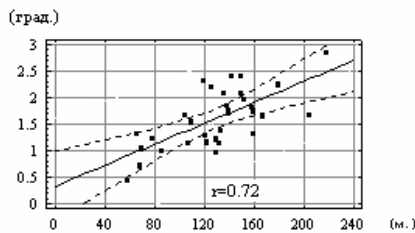


Рис. 5. График линейной модели, аппроксимирующей зависимость угла наклона от абсолютной высоты

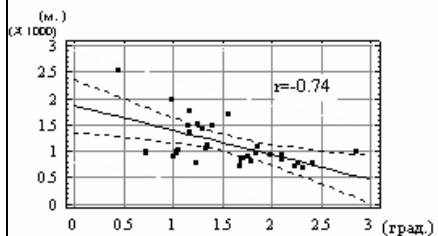


Рис. 6. График линейной модели, аппроксимирующей зависимость длины линий тока от угла наклона

Получены коэффициенты корреляции для следующих зависимостей: абсолютная высота – угол наклона 0.72; угол наклона – плановая кривизна 0.93; угол наклона – профильная кривизна 0.94; угол наклона – длина линий тока -0.74.

Исследованы также связи между морфометрическими характеристиками, полученными по растровой сетке, с показателями, рассчитанными по сетке элементарных бассейнов и отражающими интенсивность экзогенных процессов. В результате выявлена зависимость между углом наклона и глубиной эрозионного расчленения ($r=0.94$), углом наклона и показателем бассейновой эрозии ($r=0.97$).

Глава 5 Районирование рельефа на основе его морфометрических показателей с использованием ГИС-технологий

Территория Татарстана не раз служила объектом природного (физико-географического) районирования. Об этом свидетельствуют схемы районирования Ф.Н.Милькова (1953), А.В.Ступишина (1964), А.Г.Исаченко (1988), Э.Г.Коломыц (1995), А.П.Дедкова (1999), И.И.Рысина (1999), О.П.Ермолаева (2002) и др. Большинство авторов признают, что во внутризональной дифференциации ландшафтов существенную, часто решающую роль, играют именно геолого-геоморфологические условия. Последнее особенно заметно на низших ступенях ландшафтной классификации (Исаченко, 1991), когда фактор местоположения является определяющим критерием при выделении таких таксономических единиц ландшафта как урочище и тип местности.

Учитывая важность фактора рельефа в ландшафтной дифференциации, нами проведено собственное типологическое районирование рельефа территории РТ. Был применен принципиально новый подход, который заключается в следующем:

1. Проведено автоматизированное районирование на основе пространственных различий в морфометрических характеристиках рельефа. Для этого использовался набор из шести морфометрических характеристик, рассчитанных нами на основе ЦМР.

2. В качестве методики классификации (выделения районов) были использованы самоорганизующиеся отображения Т. Кохонена (1997), которые относятся к нейронным сетям.

3. В качестве ОТЕ высокой детальности использовался узел регулярной сетки. Использование подобной операционно-территориальной единицы с шагом 100 м позволяет максимально полно учесть изменения параметров рельефа на региональном уровне генерализации и, по сути, создать ландшафтную основу в ранге урочищ.

Традиционно самоорганизующиеся отображения, или Self Organizing Map (SOM) в зарубежной литературе рассматриваются как эмпирический алгоритм. Выводы, в первую очередь качественные, делаются на основе визуального анализа полученного отображения. Основным преимуществом такой модели является ее способность к правильному отображению на ординационной плоскости новых данных. Для передачи степени сходства классов можно использовать минимальное остовое дерево и его отображение Сэммо-

на (Sammon, 1969), сохраняющее метрические свойства (расстояния между классами при отображении пропорциональны расстояниям в пространстве характеристик).

Если сравнить SOM с традиционными методами, то можно отметить несколько существенных отличий (преимуществ):

1. Традиционные методы либо требуют задания заранее известных осей и шкал на них (например, разделение по той или иной характеристике рельефа), либо используют только одну ось (различные методы построения дендрограмм). Использование заранее определенных шкал может быть реализовано только при надлежащей калибровке исходных данных, что не всегда возможно. Использование дендрограмм не позволяет отобразить всю структуру «взаимоотношений» классов в силу дихотомичности.
2. Важным отличием является формализация различий между классами (районами), рассчитывая Евклидово расстояние.
3. Имеется возможность работы с пространством характеристик высокой размерности.
4. В SOM имеется возможность «управлять» компромиссом между классификацией (точностью построения классов в смысле отнесенных в них объектов) и ординацией (упорядочением классов). Именно совмещение классификации и ординации (традиционно ординируются объекты, что не позволяет отобразить на ординации новые данные) и есть сильное место SOM.
5. Существует возможность количественного описания полученных классов (районов) по набору параметров, участвовавших в классификации.

Поскольку морфометрические характеристики рельефа изменяются непрерывно, границы между классами всегда будут условны, и потому важно уметь выделять и отображать такие градиентные переходы между классами.

Полученная в результате применения нашей методики проекция классов на ординационную плоскость позволяет отображать и анализировать в географическом пространстве плавное (градиентное) изменение сочетаний характеристик изучаемого явления путем изменения границ между выделенными районами, образованными совокупностями классов SOM. Так, например, водораздельные и приводораздельные поверхности, имеющие близкие, но несколько различные сочетания морфометрических характеристик рельефа, будут сосредоточены в одном месте ординационной плоскости. Выделив "ядро" (четко выраженный по своим морфометрическим характеристикам водораздел), мы можем выделить соответствующую группу классов (нейронов) и анализировать как сочетания характеристик в них, так и положение выделенных классов в географическом пространстве.

Применяя алгоритм SOM и набор морфометрических характеристик, (высота, угол наклона, экспозиция, плановая и профильная кривизна, длина линий тока) рассчитанных в узлах сетки, было проведено автоматизирован-

ное типологическое районирование рельефа территории РТ и построена соответствующая электронная карта. Для вычислений использовалась программная реализация SOM А.А. Савельева (2004).

Полученная карта включает 19 типов районов (классов). Она уже использована для ландшафтного районирования республики в качестве фактора местоположения и может служить основой для определения сети репрезентативных участков геоэкологического мониторинга. По результатам районирования была на количественном уровне подтверждена гипотеза о климатической асимметрии склонов малых водосборов. Так, в 90 % случаев склоновые классы рельефа холодной экспозиции имеют незначительный уклон (не более 1.9°), в то время как классы рельефа, расположенные на склонах теплой экспозиции, значительно круче (до 6.6°).

Глава 6 Использование результатов морфометрического анализа для решения геоэкологических задач (на примере эрозионных потерь почвы)

В данной главе была проведена количественная оценка потенциальных потерь почвы от природно-антропогенной эрозии.

Для решения этой задачи осуществлен обзор методик по определению потенциальных потерь почв. Подробный анализ имеющихся моделей смыва приводится в трудах Г. И. Швевса (1981), Г.А. Ларионова (1993), а также в работах М. Дж. Киркби (1984), Д. К. Фланагана и Дж. М. Лафлейна (1997) и др. На первых этапах развития эрозиоведения, когда исследователи не располагали в достаточном объеме экспериментальными материалами, были предложены аналитические зависимости, основанные на элементарных представлениях о склоновых потоках (Корнев, 1937; Хортон, 1948; Костяков, 1960). По мере накопления экспериментальных данных появились эмпирические зависимости. К числу последних относятся модели Н. Н. Бобровицкой (1977), В. Д. Иванова (1975), Г. П. Сурмача (1979). К наиболее полно разработанным можно также отнести модели, созданные отечественными исследователями: Ц.Е. Мирцхулавой (1970); М.С. Кузнецовым (1981); Г.В. Бастрakovым (1994); наконец, это модель Государственного гидрологического института (ГГИ) («Инструкция по определению...», 1979). Наиболее распространенной из зарубежных зависимостей, описывающих поверхностный смыв почв, является универсальное уравнение эрозии (Wischmeier, Smith, 1965, 1978).

Именно она была взята за основу специалистами Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (НИЛЭ-ПиРП) Московского госуниверситета при разработке собственной методики определения потерь почв от стока ливневых вод. В качестве базовой методики для расчета потерь почв от талого стока НИЛЭПиРП была принята модель ГГИ, усовершенствованная Г.А. Ларионовым (1987). По мнению Л.Ф. Литвина (2002), главными основаниями при выборе модели служат фунда-

ментальность теоретической базы, теоретическая и практическая возможность создания базы данных первичных параметров, необходимых для расчета потерь почв. Именно поэтому, модели потерь почв от талого и ливневого стока, усовершенствованные в НИЛЭПиРП (Ларионов, 1993), были использованы нами для оценки смыва почв от процессов природно-антропогенной эрозии на территории Татарстана.

Для реализации данной методики расчета потенциальных потерь почвы, было написано специальное программное обеспечение, использующее результаты проведенного нами морфометрического анализа (уклоны, длины линий тока). Работы производились в масштабе 1:200000, в качестве ОТЕ высокого разрешения был выбран узел регулярной сетки с шагом 100 м на местности. При расчете смыва были исключены территории пойм, акватории. Для проведения расчетов была использована информация о содержании гумуса в почвах и ее гранулометрическом составе, которая была взята из фондовых материалов ВолгоНИИГипрозем и литературных источников с их жесткой привязкой к региону исследований: (Колоскова, 1962, 1964, 1985), (Винокуров, 1962, 1975, 1976, 1982), (Пухачев, Бухараева, 1984), (Шакиров, 1982, 1991).

Применяя указанную выше методику, а также опубликованные данные и результаты морфометрического анализа, были рассчитаны и отображены в виде электронных карт потенциальные потери почвы от стока ливневых вод в РТ. Анализ результатов показывает, что в среднем для республики эти потери составляют 5.56 т/га в год. В случае полного сведения лесов ливневой смыв увеличивается в среднем на 34 % и составляет 7.44 т/га в год.

Нами также построена карта потенциальных потерь почв от стока талых вод, анализ которой показывает, что эти средние многолетние потери почв для РТ составляют 0.46 т/га в год. Используя данные о запасах воды в снеге, опубликованные С.Ф. Батыршиной (2004), нами были определены изменения, наблюдающиеся в потенциальных потерях почвы от стока талых вод за период 1961-2001 гг. и построена соответствующая электронная карта. В среднем для территории РТ запасы воды в снеге за этот период возросли, как следствие этого, интенсивность смыва почв увеличилась на 25 %.

Результирующая карта годового смыва почв (в условиях чистого пара) строилась поэлементным сложением значений в узлах соответствующих регулярных сеток ливневого и талого смыва. Анализ полученной карты (рис. 7) говорит о том, что потенциальные годовые потери почв от эрозии на территории РТ в среднем составляют 6.13 т/га в год. При этом наибольший смыв характерен для междуречья Волги и Свияги, верхнего и среднего течения р. Меша, Казанка, восточного Предкамья, крутым склонам долин Степ. Зая и Кичуя. Наименьший смыв соответствует низменным ландшафтам Западного Закамья, северо-восточному Закамью, южному Предсвияжью, Кукморскому району, нижнему течению р. Меша и Казанка.

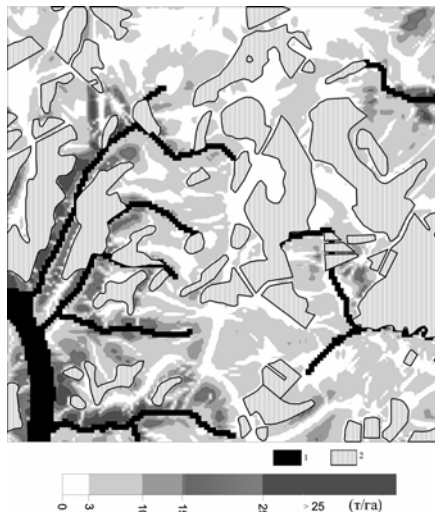


Рис. 7 Потенциальные потери почв РТ за год (1- реки и поймы, 2- леса)

В этой главе также были получены результаты оценки безвозвратных потерь почвы от процессов поверхностной природно-антропогенной эрозии. Для этого были использовано понятие о допустимом смыве почв и почвозащитные коэффициенты растительности, предложенные М.Н. Заславским (1984). Были построены соответствующие электронные тематические карты. Анализируя карту превышений допустимых потерь почвы можно сказать, что безвозвратные потери почвы от эрозии для территории РТ в среднем составляют 0.44 т/га в год.

Таким образом, впервые расчетными средствами на базе ГИС-технологий, рассчитаны потенциальные потери почв РТ от стока дождевых и талых вод. Эти исследования могут лечь в основу проектирования противоэрозионных мер.

Заключение

1. Разработана методика построения цифровых моделей рельефа кубическими параболоми, позволяющая производить расчеты с меньшими ошибками по сравнению с наиболее известными методиками. Произведены тестовые расчеты, подтверждающие уменьшение ошибок в предлагаемой методике построения ЦМР.

2. Применяя разработанную методику, нами создана ЦМР масштаба 1:200000 Республики Татарстан с шагом 100 м. Оценка точности моделирования рельефа на средне- и крупномасштабных топокартах свидетельствует, что средние ошибки высот не превышают 5-6 м, при переходе от карты мас-

штаба 1:200000 к карте 1:50000. Ошибки углов наклона составляют 0.8 - 1.5° при сравнении карт тех же масштабов.

3. Проведенный региональный морфометрический анализ с широким использованием ГИС-технологий позволил на количественном уровне установить основные параметры рельефа Татарстана. Типы рельефа, выделенные для РТ по историко-генетическому признаку, имеют также четкие различия и морфометрических характеристик. При переходе от глубоко расчлененной денудационной ступенчатой равнины ярусных плато к очень слабо расчлененной аккумулятивной террасовой равнине левобережий крупных рек происходит закономерное уменьшение абсолютных высот, углов наклона, профильной и плановой кривизны, увеличиваются длины линий тока.

4. Разработаны методические подходы к автоматизированному типологическому районированию рельефа на основе его морфометрических показателей и нейронных сетей. Реализация методики позволила произвести районирование рельефа РТ на региональном уровне генерализации. Это районирование отражает морфолого-генетические особенности рельефа и характеризует их количественно. Результаты районирования могут быть использованы для автоматизированного создания ландшафтной карты на уровне типов местности и урочищ. В ходе типологического морфометрического районирования была количественно подтверждена гипотеза о климатической асимметрии склонов долин малых рек.

5. Результаты морфометрического анализа использованы для целей геоэкологии. С помощью ГИС-технологий и известных методик рассчитаны эрозионные потери почвы для всей территории РТ. Проведенные геоэкологические исследования по расчету эрозионных потерь почвы позволяют в пределах допустимой погрешности для территории РТ количественно оценить потери почвы от природно-антропогенной склоновой эрозии. В результате установлено, что потенциальные потери почв за год в среднем составляют 6.13 т/га, а безвозвратные потери почв с учетом допустимых потерь и почвозащитной роли агрофона в среднем составляют 0.44 т/га в год. При этом на 60 % земель РТ смыв не превышает допустимых значений, 20 % характеризуются безвозвратными потерями до 1.5 т/га в год, на 20 % они колеблются от 1.5 до 10 т/га в год. Наибольшие безвозвратные потери характерны для типичных дерново-карбонатных почв (до 2.3 т/га в год), а также для дерново-карбонатных выщелоченных и оподзоленных почв - до 1.3 т/га в год. Серые лесные почвы характеризуются значениями безвозвратных потерь почв от 0.09 т/га в год до 0.8. Черноземы имеют самые небольшие потери (максимум до 0.28 т/га в год у черноземов выщелоченных). Построены соответствующие электронные карты потерь почв от талого, ливневого стока, годовых потерь, а также карты допустимых потерь и превышений над допустимыми потерями, которая является по своей сути картой пространственной оценки эрозионного риска.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермолаев О.П. Геоморфометрический анализ рельефа РТ / О.П.Ермолаев, А.А.Савельев, К.А.Мальцев // Доклады и краткие сообщения 17-го Межвузовского совещания по проблемам эрозии почв русловых и устьевых процессов. Краснодар, 2002. - С. 99-100.
2. Беленко О.В. Применение трехмерного моделирование в гидрогеологических исследованиях / О.В.Беленко, К.А.Мальцев // Георесурсы. – 2002. №2(10) - С. 33-34.
3. Ермолаев О.П. Геоморфометрический анализ рельефа для целей ландшафтно-экологического картографирования / О.П.Ермолаев, К.А.Мальцев //Материалы межвузовской научной конференции. «Проблемы природопользования в районах со сложной экологической ситуацией». Тюмень, Издательство Тюменского Государственного Университета, 2003. - С. 82-84.
4. Ермолаев О.П. Геоинформационный анализ ландшафтной структуры борального экотона востока русской равнины / О.П.Ермолаев, М.Е.Игонин, К.А.Мальцев //Материалы международной научной конференции «Intercarto-9». Новороссийск, Севастополь, 2003. - С. 114-118.
5. Ермолаев О.П. Анализ экологических функций рельефа средствами ГИСТехнологий / О.П.Ермолаев, К.А.Мальцев, А.Р.Шайхулов // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 200-летию Казанского университета. «Современные глобальные и региональные изменения геосистем». Казань, Изд-во КГУ, 2004. - С. 438-440.
6. Ермолаев О.П. Потенциальный смыв почв в республике Татарстан / О.П.Ермолаев, К.А.Мальцев //Материалы всероссийской научной конференции, посвященной 200-летию Казанского Университета «Современные глобальные и региональные изменения геосистем». Казань, Изд-во КГУ, 2004. - С. 76-78.
7. Мальцев К.А. Построение цифровых матриц высот кубическими парабололами / К.А.Мальцев //Тезисы докладов VI республиканской научной конференции «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан». Казань, Изд-во Отечество, 2004. - С. 141-143.
8. Савельев А.А. Методы самоорганизации для выделения и картографического отображения тематических категорий в геоинформационных системах / А.А.Савельев, О.П.Ермолаев, С.С.Мухарамова, К.А.Мальцев // Исследования по прикладной математике и информатике. Выпуск 25. Казань, Изд-во КГУ, 2004. - С. 117-125.
9. Савельев А.А. Подходы к районированию рельефа на основе его морфометрических показателей с использованием искусственных нейронных сетей / А.А.Савельев, О.П.Ермолаев, С.С.Мухарамова, К.А.Мальцев // Доклады XII съезда РГО. Геоэкология и природопользование. Т. 4.-СПб., 2005. - С. 348 - 356.

10. Мальцев К.А. Морфометрический анализ рельефа Республики Татарстан средствами геоинформационных технологий / К.А.Мальцев // Материалы Всероссийской научной конференции «Современные аспекты экологии и экологического образования». Казань, Изд-во КГУ, 2005. - С. 362-364.

11. Мальцев К.А. Построение цифровых моделей рельефа кубическими параболлами / К.А.Мальцев // Геоморфология. – 2006. № 2. (Принята к публикации)